



L'initiative européenne "Suivi global pour l'environnement et la sécurité" et le protocole de Kyoto

Gérard Bégni, Minh Ha-Duong, Jean-Pierre Lacaux, E. Lambin, Hervé Le Treut, A. Morel, E. Raschke, B. Saugier, P. Vellinga, A.G. Dekker, et al.

► To cite this version:

Gérard Bégni, Minh Ha-Duong, Jean-Pierre Lacaux, E. Lambin, Hervé Le Treut, et al.. L'initiative européenne "Suivi global pour l'environnement et la sécurité" et le protocole de Kyoto. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 2000, 157, pp.18-35. halshs-00004174

HAL Id: halshs-00004174

<https://shs.hal.science/halshs-00004174>

Submitted on 21 Jul 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'INITIATIVE EUROPEENNE "SUIVI GLOBAL POUR L'ENVIRONNEMENT ET LA SECURITE" (GMES) ET LE PROTOCOLE DE KYOTO¹

BESOINS EN MATIERE D'INFORMATIONS ET DE DONNEES ASSOCIEES

G. BEGNI, MEDIAS-FRANCE, France - **M. HA DUONG**, CIRED, France - **J.P.LACAU**X, OMP/LA, France - **E. LAMBIN**, Université catholique de Louvain, Belgique - **H. LE TREUT**, UPMC, France - **A. MOREL**, LPCM, France - **E. RASCHKE**, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GbmH, Allemagne - **B.SAUGIER**, LEV, France - **P.VELLINGA**, **A.G.DEKKER**, **H. VAN DER WOERD**, **J GUPTA**, IVM, Pays-Bas - **S. ZERBINI**, Università di Bologna, Italie.

0 - AVANT-PROPOS

En octobre 1998, un certain nombre d'institutions impliquées dans le développement des activités spatiales en Europe² ont adopté un document appelé «Manifeste de Baveno», rappelant l'importance stratégique pour l'Europe de se doter des moyens de suivi global de l'environnement au niveau mondial. L'une des priorités identifiées est le respect et la surveillance des engagements pris dans le cadre du protocole dit "de Kyoto", en application de la Convention Cadre des Nations Unies pour le Contrôle du Changement Global (UNFCCC). Pour atteindre ce but, il est nécessaire d'identifier les mécanismes physiques et chimiques associés aux changements globaux de l'environnement, et plus particulièrement, aux gaz à effet de serre, à leurs sources et leurs puits. Il est également nécessaire de créer des outils d'observation et de contrôle afin de mettre en œuvre un système opérationnel de surveillance de l'environnement, permettant notamment de s'assurer de la mise en œuvre effective des engagements pris. Les systèmes d'observation spatiale sont des outils privilégiés pour répondre à un tel objectif.

Suite à l'adoption de ce manifeste, le CNES a proposé, au second semestre de 1998, de prendre en charge une étude, menée par un groupe d'experts européens auteurs du présent article, coordonnés par MEDIAS-FRANCE, afin d'identifier les besoins en information nécessaires. Un tel travail, présenté ici, peut constituer un point de départ permettant d'identifier comment les moyens spatiaux, conjointement à des informations collectées *in situ* et assimilées dans des modèles adéquats, peuvent répondre aux besoins précis énoncés dans le protocole de Kyoto. En dépit d'avancées importantes, ces questions sont loin d'être résolues par la communauté scientifique, institutionnelle et industrielle. Il est de la mission de la SFPT de promouvoir la recherche dans le domaine de l'Observation de la Terre. Les lecteurs de notre bulletin trouveront dans le présent article une source d'informations, mais également et surtout une source de réflexions pouvant permettre de donner de nouvelles orientations multidisciplinaires à leurs activités. Ils pourront, s'ils le souhaitent, trouver de plus amples descriptions des programmes spatiaux dans la documentation "papier" et électronique des diverses agences spatiales et du CEOS, et plus particulièrement, en ce qui concerne les programmes où la France est engagée, dans le bulletin spécial de la SFPT consacré au CNES (n°154).

Le Manifeste de Baveno a donné naissance à une initiative européenne en cours de développement, "Suivi Global pour l'Environnement et la Sécurité", coordonnée par le CCR/IAS (JRC/SAI), et connue sous l'acronyme anglo-saxon GMES. Toute information sur le développement de cette initiative peut être obtenue auprès de cet Institut.

¹Preprint - La version finale de ce texte a été publiée dans Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection 157 (2000-1) pp. 18-35.

² BNSC, CNES, DLR, Commission Européenne, EARSC, ESA, EUMETSAT, ultérieurement rejoints par l'ASI.

1 - INTRODUCTION : BESOINS EN DONNEES GLOBALES

1.1 De l'UNFCCC au manifeste de Baveno

Il est certainement utile de rappeler le contexte général des conventions internationales sur l'environnement, de l'UNFCCC et du protocole de Kyoto. En effet, il existe plus de 870 accords légaux concernant de façon directe ou indirecte les problèmes liés à l'environnement, et plus de 152 traités internationaux concernant l'environnement et l'utilisation des ressources. Les principales conventions sont citées dans le Tableau 1 ci-dessus (Gupta, 1998). Ces conventions sont souvent précisées par des protocoles; par exemple, le protocole "de Montréal", que nous serons amenés à évoquer (§2.1), précise la mise en oeuvre des conventions de protection de la couche d'ozone.

La Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (UNFCCC) a été adoptée en 1992, et est entrée en vigueur en 1994. Depuis 1995, plusieurs assemblées annuelles ont eu lieu, réunissant la Conférence des Parties à la Convention (COP). L'objectif final de l'UNFCCC (Article 2) est la stabilisation des concentrations en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau empêchant une interférence anthropique dangereuse avec le système climatique. Un tel niveau devrait être atteint dans un laps de temps suffisant pour permettre aux écosystèmes de s'adapter naturellement au changement climatique, pour s'assurer que la production alimentaire n'est pas menacée et pour permettre un développement économique durable.

Le protocole de Kyoto a été adopté en décembre 1997 lors de la troisième COP. Ce protocole énumère à l'Article 3 les objectifs quantitatifs de réduction d'émissions de gaz pour tous les pays cités en Annexe 1. Le protocole de Kyoto a pour objectif de réduire un ensemble de six gaz (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs, PFCs et SF_6) d'environ 5% pour la période 2008-2012, 1990 étant l'année de référence pour les trois premiers gaz et 1990 ou 1995 étant l'année de référence pour les trois autres gaz.

Toutes les Parties sont dans l'obligation de :

- 1 - dresser un inventaire au niveau national des émissions de GES en identifiant leurs sources et leurs puits (causes de leur disparition),
- 2 - préparer les programmes de politique nationale sur le changement climatique,
- 3 - développer les plans d'adaptation et de gestion des zones côtières, et enfin,
- 4 - intégrer les considérations climatiques dans les autres politiques concernées.

Les tâches principales consistent à développer une méthodologie commune pour le calcul des émissions (Article 4.1(a)) et leur absorption dans des puits (Article 4.2(c)). D'autres tâches consistent à examiner les communications faites par toutes les Parties concernant leurs émissions et leur mise en oeuvre du protocole (Articles 4.1(a) et (j), Article 4.2(b)), à analyser et amender la liste des pays cités en Annexe I et II (Articles 4.2(f)). Il est prévu de prendre des dispositions pour fournir une aide technique et financière aux pays en voie de développement (Article 12.7) selon leur demande et en fonction de leurs engagements.

Objet	Conventions		Statut	But
Atmosphère	Couche d'ozone, 1985		En vigueur	Protection de la couche d'ozone
	Contrôle des CFC, 1987		En vigueur	Elimination progressive de l'utilisation des CFC et HFC
	Changement climatique, 1995		En vigueur	Stabilisation de la concentration globale en GES
Eau	Eaux douces	Cours d'eau internationaux	Adoptée en 1997	Réglementation qualitative et quantitative des cours d'eaux internationaux
	Océan	Rejets dans l'océan, 1972 ; convention OSPAR, 1992	En vigueur	Prévention des rejets de déchets dangereux, y compris de la part des navires, des avions et des plateformes ; Réglementation des rejets d'autres types de déchets
		Pollution due aux navires, 1972	En vigueur	Réglementation des déchets rejetés par les navires
		Loi sur la Mer, 1982	En vigueur	Protection, préservation, et utilisation pacifique, équitable et efficace de la mer
Faune sauvage et habitat	Traité de l'Antarctique, 1959, 1980		En vigueur	Conservation et utilisation rationnelle des ressources marines vivantes
	Zones marécageuses, 1971		En vigueur	Protection et amélioration des zones marécageuses
	Espèces en voie de disparition		En vigueur	Protection de la surexploitation des espèces végétales et animales en voie de disparition par l'interdiction de leur commerce international
	Espèces migratrices, 1979		En vigueur	Conservation et gestion efficace des espèces migratrices
	Biodiversité, 1992		En vigueur	Conservation de la diversité biologique, utilisation durable de ses composantes et partage juste et équitable des bienfaits apportés par l'utilisation des ressources génétiques
	Désertification, 1994		En vigueur	Contrôle et diminution des effets néfastes de la désertification
Matières dangereuses	Déclaration d'accidents nucléaires, 1986		En vigueur	Déclarations et actions à entreprendre en cas d'accident nucléaire
	Circulation des déchets dangereux		En vigueur	Réglementation de la circulation des déchets dangereux

Tableau 1. Principaux traités sur l'environnement (Gupta, 1998)

L'importance de ces questions a été formellement reconnue par le « Manifeste de Baveno ». Selon les termes de celui-ci, le présent document examine les besoins en informations et données associées. L'objectif final est de concevoir un service de suivi global pour l'environnement et la sécurité. Un tel service devrait avoir une dimension stratégique liée à l'identification, la prévention ou la diminution des effets indésirables susceptibles de menacer la stabilité de la société dans son ensemble. Il devrait aussi conforter l'indépendance européenne en permettant l'accès aux données pertinentes et en assurant leur traitement, permettant ainsi de fournir les informations nécessaires. Plus spécifiquement, il représenterait une contribution européenne significative pour le suivi de la mise en œuvre du protocole de Kyoto dans le cadre de l'UNFCCC. Il convient de garder à l'esprit que l'observation systématique de la Terre dans le cadre du protocole de Kyoto peut être fortement couplée au suivi et contrôle d'autres conventions internationales, telles que les traités sur la biodiversité ou la désertification ou le protocole de Montréal.

La convergence entre les besoins en données et informations et les possibilités offertes par les systèmes d'observation par satellite associés à des mesures *in situ* doit devenir un élément clé de l'agenda spatial européen.

1.2 Quelques estimations quantitatives globales

Les tableaux 2 et 3, publiés par l'IPCC en 1994, donnent une vue d'ensemble de l'ampleur des sources et puits principaux de CO₂ et CH₄. Les flux de méthane sont bien plus faibles que ceux de gaz carbonique, mais l'effet de serre de ce gaz est nettement plus important, de sorte que sa contribution totale est significative.

Ces données doivent être replacées dans une perspective historique. Les paléoclimatologues estiment par exemple que la teneur en CO₂, restée relativement constante au cours du millénaire précédant l'ère industrielle (~275 ppmv) a augmenté de 30% depuis 200 ans et atteint aujourd'hui 370 ppmv ; la teneur en CH₄ est double de ses valeurs interglaciaires les plus hautes (B.Moore, 2000). Naturellement, les évolutions constatées ces dernières années sont suivies avec la plus extrême attention ; en ce qui concerne l'Union Européenne, on note par exemple une diminution des émissions de l'ordre de 4% entre 1990 et 1994, mais une remontée d'environ 2% entre 1994 et 1996 (Commission des Communautés Européennes, 1999). Seule une politique extrêmement volontariste permettra de respecter ou même d'approcher les objectifs recherchés.

Les émissions ne sont jamais mesurées directement. Les Parties ont convenu de mesurer des activités et d'attribuer à chacune des facteurs d'émission (cf. tableau 3). Les méthodologies de définition des facteurs d'émission de GES et les méthodes d'estimation des activités sont régulièrement mises à jour par l'OCDE et l'IPCC.

Sources	GtC/a n
Emissions de la surface océanique	90
Production et respiration primaire nette globale (végétation et sols)	60
Emissions provenant des combustibles fossiles et de la production de ciment	5.5
Emissions nettes dues aux changements dans l'utilisation des sols (principalement en zone tropicale)	1.6
Puits	
Absorption par la surface océanique	92
Absorption par la végétation et le sol	61.4
Changement dans l'utilisation des sols (principalement reboisement de l'hémisphère Nord)	0.5

*Tableau 2 : Bilan moyen annuel de gaz carbonique de 1980 à 1989
Les sources et puits de CO₂ sont exprimées en GtC/an (IPCC, 1994)*

Sources	Tg(CH ₄)/an
Naturelles	
• Zones marécageuses	115 (55-150)
• Termites	20 (10- 50)
• Océans	10 (5- 50)
• Autres	15 (10- 40)
Anthropiques	
• Combustible fossile total	100 (70-120)*
• Fermentation entérique	85 (65- 100)
• Rizières	60 (20- 100)
• Biomasse brûlée	40 (20- 80)
• Enfouissement des déchets	40 (20- 70)
• Déchets animaux	25 (20- 30)
Eaux usées domestiques	25 (15- 80)
Puits	
Augmentation dans l'atmosphère	37 (35- 40)
Disparition dans l'atmosphère (durée de vie = 9.4 ans)	
• OH troposphérique	445 (360-530)
• Stratosphère	40 (32- 48)
• Sols	30 (15- 45)

Tableau 3: Estimation des sources et des puits de méthane Tg(CH₄)/an (IPCC, 1994)

* Source fractionnaire du carbone fossile basée sur une mesure du ratio atmosphérique de ¹⁴CH₄ à ¹²CH₄

Gaz	Catégorie de source	Facteur d'émission	Données d'activité	Pourcentage d'incertitude globale
CO ₂	Energie	7%	7%	10%
CO ₂	Processus industriels	7%	7%	10%
CO ₂	Changements dans l'utilisation du sol et sylviculture	33%	50%	60%
CH ₄	Biomasse brûlée	50%	50%	100%
CH ₄	Activités liées au pétrole et au gaz naturel	55%	20%	60%
CH ₄	Mines de charbon	55%	20%	60%
CH ₄	Culture du riz	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$	1
CH ₄	Déchets	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	1
CH ₄	Animaux	25%	10%	25%
CH ₄	Déchets animaux	20%	10%	20%

Tableau 4 : Estimation du pourcentage d'incertitude concernant les émissions (IPCC, 1996)

Le tableau 4 donne les pourcentages d'incertitude concernant les facteurs d'émission et les données d'activités, tels qu'ils ont été publiés dans les Directives pour l'Inventaire des Gaz à Effet de Serre, édition de 1996. A noter que pour la culture du riz et les déchets, les incertitudes sont données en fractions de l'incertitude globale.

En ce qui concerne le N₂O, dont la durée de vie dans l'atmosphère est estimée à 170 ans, les termes principaux du bilan sont connus avec une incertitude encore plus grande (Graedel & Crutzen, 1993). Ces auteurs proposent l'évaluation suivante (tableau 5) :

Sources	Tg N /an
Naturelles	
feux et réduction anaérobie des nitrates du sol par des bactéries	5,5 - 6,7
processus bactériens dans les océans	1,4 - 2,6
Anthropiques	
• industrie, fertilisants, feux	3,6 - 5, 1
Puits	
• destruction dans la stratosphère (voir § 2.1)	8,7

Tableau 5.

Les composés fluorés sont essentiellement produits par l'activité industrielle ; ils sont extrêmement stables (durée de vie de l'ordre de 50.000 ans), et leur potentiel de réchauffement global est nettement plus élevé que celui du CO₂. Les informations qui suivent sont extraites de la Communication de la Commission des Communautés Européennes de 1999 et concernent les pays de l'Union Européenne.

- En 1990, 100% des émissions en HFC étaient constitués de HCFC-22, substance qui détruit la couche d'ozone stratosphérique (voir §2.1). Suite à l'application du Protocole de Montréal, ces émissions ont décliné de 99%, mais d'autres HFC ont été utilisés comme produits de substitution ; leurs émissions ont fortement augmenté depuis 1990 ; les projections indiquent qu'en 2010, le niveau d'émission pourrait être 5 fois celui de 1995.

- Les PFC sont principalement produits par l'industrie de fabrication de l'aluminium. En 1990, l'émission était de 11 Mtonnes en équivalent CO₂. Suite aux progrès technologiques, mais aussi au recul de cette activité en Europe, les émissions ont chuté de 55%.
- Le SF₆ est le gaz à effet de serre le plus puissant. Il est émis par diverses industries ; les émissions ont sans cesse croissantes ; en 1995, 14 Mtonnes en équivalent CO₂ ont été émises.

Les paramètres les plus importants à mesurer afin de contrôler les changements concernant les GES seront analysés dans les chapitres suivants.

1.3 Un cadre d'étude selon trois approches

On peut identifier les questions soulevées par le Manifeste de Baveno à travers trois approches emboîtées :

Approche (a) : Pour le protocole de Kyoto. Le principal défi auquel se trouvent confrontées les Parties au protocole de Kyoto est le suivi des sources et puits des GES, afin de quantifier la réduction des émissions de chaque Partie (en termes de bilan net entre les sources et puits) pendant la période définie. L'approche (a) est une approche de suivi pour la mise en œuvre de l'article 3 du protocole de Kyoto. Elle implique que les outils pertinents soient disponibles et acceptés au niveau mondial, afin de contrôler le respect du protocole par chaque partie, et de permettre de mettre en place des mécanismes tels que la négociation de permis d'émissions, des crédits basés sur des projets, et les mécanismes pour un développement propre (CDM). Pour traiter ces questions, il n'est pas nécessaire de prendre en considération la dynamique ou les processus de chimie atmosphérique, ni d'utiliser des techniques de modélisation globale. Les émissions et absorptions de GES doivent être évaluées à l'échelle géographique adéquate, en utilisant les paramètres observables appropriés et les modèles spécifiques qui les concernent (par exemple, les flux de CO₂ absorbés par une forêt ne sont pas mesurés directement, mais peuvent être déduits d'informations telles que la superficie, la densité et les espèces d'arbres, l'état phénologique et phytosanitaire, etc.). Cette première approche ne prend en considération ni les conséquences de ces émissions et absorptions de gaz sur l'évolution climatique à l'échelle globale et régionale, ni leurs impacts. La difficulté de la tâche ne doit pas être sous-estimée : il y a actuellement une grande incertitude sur les inventaires des sources et des puits ; néanmoins, une réduction de 8 % doit pouvoir être mesurée en Europe en 2012. Il faut évaluer si les techniques de télédétection, utilisées avec les mesures in situ adéquates dans le cadre de modèles appropriés en termes d'échelle et de précision, peuvent permettre d'atteindre ce but. De plus, il convient de remarquer que les mécanismes de mise en œuvre du protocole de Kyoto, même envisagés dans une perspective aussi limitée, peuvent créer le besoin d'autres informations (par exemple, concernant la capacité à mettre en œuvre des projets dans le cadre du CDM).

Approche (b) : Pour la Convention sur le Climat. La deuxième approche concerne également le protocole de Kyoto, mais se place dans une perspective plus large, celle de l'Article 2 de l'UNFCCC (cf. ci-dessus).

Approche b₁. Les engagements décrits ci-dessus concernant la limitation et la réduction des émissions ne sont pas un objectif en soi. Ils ne sont qu'une façon concertée de limiter l'évolution de la concentration en GES et leurs effets néfastes sur les changements climatiques, le but à long terme étant de stabiliser ces concentrations à des niveaux de sécurité acceptables. Pour une telle évaluation, les techniques de modélisation globale, qui comprennent les mécanismes globaux d'émissions, les phénomènes de transport et la chimie atmosphérique doivent être utilisés. Cette question ne concerne pas seulement le bilan en GES au niveau des Parties, mais aussi le cycle global du carbone (on utilise le mot «cycle» quand un composé spécifique est transporté et conservé sans changement) ainsi que les processus globaux. D'où le lien avec l'étape suivante :

Approche b₂. Pour obtenir une vision claire de l'impact du protocole de Kyoto, il faut que les effets réels de sa mise en œuvre sur l'évolution climatique pendant et après la période de référence soient vérifiés et évalués, de même que leurs impacts en termes d'écologie et d'alimentation. De plus, on doit aussi évaluer les impacts physiques de ces changements et leurs effets sur la société. Les zones côtières par exemple sont importantes de ce point de vue : 60 % environ de la population mondiale vit à moins de 100 km de la mer ; ce groupe pourrait être sérieusement affecté par une montée du niveau de la mer. On trouve également de grandes concentrations de populations humaines le long des fleuves; les changements du régime des eaux fluviales induits par le changement climatique affecteront directement ces populations. Les modifications des cycles hydrologiques et des régimes de vents doivent être estimées afin d'évaluer la sécurité alimentaire, l'accès à l'eau et la dissémination des maladies transmises par divers vecteurs. Les prévisions météorologiques saisonnières seront importantes pour stimuler l'adaptation et réduire les effets socio-économiques dus au changement climatique.

Au-delà de ces objectifs de société, l'analyse des impacts peut être utilisée en tant qu'indicateur de l'évolution climatique (montée du niveau de la mer, nombre et superficie des feux de forêt, évolution de la cryosphère et de la désertification, etc.). Il est nécessaire de développer des technologies appropriées se basant sur des paramètres vérifiables et contrôlables issus de la télédétection et des données in situ associées pertinentes, ainsi que des techniques validées et adaptées de modélisation et d'assimilation des données.

Approche (c) : Pour la Science. La troisième approche est encore plus ambitieuse et va nettement au-delà du protocole de Kyoto. Elle concerne le suivi global de l'environnement, en prenant en compte toutes les contributions au changement global de climat et d'environnement, et son évolution dans le temps – et pas seulement l'influence des effets dus aux variations des GES. Une telle approche peut être considérée comme le but final d'un système de suivi global de l'environnement. Il est quasiment impossible de la décrire de façon exhaustive dans toutes ses dimensions. Toutefois, il est important de prendre en compte l'influence des éléments actuellement hors du contrôle des conventions internationales (protocoles de Montréal, de Kyoto,...), à la fois pour des raisons scientifiques et afin d'ouvrir la voie aux réglementations régionales et internationales à venir. Lors de l'élaboration du présent chapitre, les éléments paraissant importants de ce point de vue (aérosols, couvert nuageux, etc.) seront soulignés.

La compréhension du comportement des différentes composantes du système terrestre et de leur interaction est l'un des principaux défis actuels de la recherche scientifique sur l'environnement. Il est nécessaire d'effectuer des observations très précises et à long terme de la plupart des paramètres pertinents décrivant les différents éléments du système, afin de garantir une compréhension et une documentation adéquate des interactions et des changements se produisant à différentes échelles spatio-temporelles. Dans ce chapitre, nous considérerons séparément les cycles et processus liés aux terres, aux océans et à l'atmosphère. Des paragraphes spécifiques seront également consacrés à la modélisation globale, et à quelques considérations socio-économiques. Nous devons garder à l'esprit que la Terre doit être analysée en tant que système global. Il est nécessaire de développer une approche multidisciplinaire utilisant les mesures faites depuis l'Espace et in situ, comprenant les composantes du système terrestre (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, géosphère et biosphère). Les observations spatiales ont considérablement augmenté le volume des informations disponibles et leur couverture spatiale et temporelle, ainsi que leur homogénéité et leur fiabilité. Toutefois, les mesures in situ restent indispensables, car elles représentent une source indépendante d'informations complémentaires pour l'étalonnage et la validation des informations spatiales, au moyen d'une approche intégrée fondée sur l'assimilation des données par les techniques de modélisation (comme l'ont souligné les conclusions de l'IPCC).

2 L'ATMOSPHERE

2.1 - Chimie atmosphérique et bilan radiatif de la Terre

Les molécules des GES présentent des niveaux de transition quantiques de faible énergie (ordre du dixième d'eV), caractéristiques de modes propres liés à leur configuration géométrique (aucune de ces molécules n'est bi-atomique), et correspondant à l'énergie de photons de la gamme de longueur d'ondes de 7 à 13 μm (fenêtre de l'infrarouge thermique). L'équilibre thermodynamique de la Terre est fortement lié à l'absorption de ce rayonnement infrarouge par l'atmosphère. Sans cette absorption, la température terrestre serait plus basse de 30 degrés environ. Toute augmentation de concentration en GES tend donc à augmenter la température de surface, en même temps que surviennent des effets contraires, tels que l'influence des aérosols. La concentration dans l'atmosphère de CO_2 et CH_4 augmente à un rythme d'environ 0.5 % et 1 % par an, alors que dans le même temps, la température moyenne de surface a augmenté de 0.3 à 0.6 degrés en un siècle. Ce taux a notablement augmenté depuis le début de l'ère industrielle (Briffa et al., 1995). Cette tendance semble se poursuivre, malgré des événements exceptionnels, comme l'éruption du Pinatubo, qui auraient dû avoir une influence contraire. Les analyses paléoclimatologiques confirment la forte corrélation existant entre la température d'une part, la concentration en CO_2 et CH_4 d'autre part (Graedel et al., 1993).

Pour établir le bilan du carbone, il est nécessaire de quantifier ou d'estimer les flux entrant dans certains réservoirs ou les quittant, comme par exemple, l'atmosphère, les océans ou les écosystèmes continentaux.

Pour établir le bilan radiatif de l'atmosphère, il est nécessaire de prendre en compte les GES, et notamment le CO_2 et le CH_4 .

Le CO_2 n'est impliqué que dans les processus physiques et biologiques, et non dans les transformations chimiques : il n'est pas détruit dans l'atmosphère par réaction chimique, et de faibles quantités sont produites par l'oxydation du CO et les hydrocarbures. Les sources naturelles et anthropiques de CO_2 sont énumérées dans le tableau 2.

Le CH_4 n'est pas créé dans l'atmosphère, mais son puits principal est le mécanisme de perte par le radical hydroxyle : $\text{CH}_4 + \text{OH}^\circ \rightarrow \text{CH}_3^\circ + \text{H}_2\text{O}$ (cf. Tableau 3). Il faut souligner ici l'importance des radicaux OH° pour la chimie atmosphérique et rappeler que la photolyse de l'ozone conduit à la production de radicaux OH° .

Pour calculer le « bilan radiatif du carbone » (CO_2 et CH_4), trois composantes de base sont nécessaires :

- La détermination de la *concentration* en CO_2 et CH_4 (et des autres GES) par des mesures directes (réseaux au sol et plateformes spatiales). Le réseau primaire de stations au sol peut être complété par de nouvelles stations au sol, qui enregistreraient avec la plus haute résolution spectrale et la plus grande précision possible, les spectres du rayonnement infrarouge thermique montant et descendant, dans les bandes spectrales d'absorption les plus importantes pour ces gaz. Ces instrumentations devraient être effectuées sur des sites convenablement maintenus, comme les stations de premier niveau des services météorologiques. Les mesures depuis l'espace permettent de compléter ces mesures au sol. Compte tenu de la stabilité des composants concernés, quelques jours de mesures effectués tous les 5 à 8 ans pourraient suffire pour les mesures spatiales, qui seraient effectuées à partir de la Navette (ou plus tard de la Station Spatiale Internationale),

- La mesure ou l'évaluation des *puits* de CO_2 et CH_4 au niveau des écosystèmes (cf. §3.1),
- La mesure ou l'évaluation des *sources* de CO_2 et CH_4 au niveau de chaque écosystème (cf. §3.1), et pour les sources anthropiques, par les informations socio-économiques telles que les chiffres de consommation de carburants (cf. §5.1). La connaissance détaillée de ces processus naturels est par conséquent essentielle pour évaluer l'impact des émissions anthropiques. Ainsi, l'approche (c) qui étudie le système terrestre dans son ensemble est-elle essentielle pour comprendre les changements en CO_2 dans l'atmosphère, et leurs relations avec les processus concernant les océans et les terres.

Pour évaluer la destruction de CH_4 dans l'atmosphère, il est nécessaire d'effectuer le suivi de la photochimie troposphérique au niveau des gaz (principalement O_3 , radiations UV et vapeur d'eau). On portera une attention toute particulière sur les régions tropicales où les concentrations en OH° sont importantes, et où la circulation atmosphérique transporte les masses d'air des latitudes tempérées vers les latitudes équatoriales.

Il faut également remarquer que les autres GES pris en compte dans le protocole de Kyoto (N_2O , SF_6 , PFC, HFC) sont aussi très stables (50.000 ans pour certains de ces derniers!) et ne sont pas impliqués dans la chimie atmosphérique troposphérique. Cette stabilité explique la raison pour laquelle il est si important d'exercer un contrôle sur les sources et les puits naturels ou anthropiques. Sans vouloir entrer ici dans des considérations détaillées liées à la chimie stratosphérique, et notamment au cycle de l'ozone et au Protocole de Montréal (tableau 1), trois remarques s'imposent cependant :

- La dissociation de l'ozone stratosphérique (dont la formation protège la terre contre le rayonnement solaire ultraviolet au-dessous de 242 nm) est catalysée par les radicaux qui peuvent se présenter sous la double forme X° et XO° . Le composé N_2O , très stable dans la troposphère, est oxydé par l'oxygène monoatomique stratosphérique en radicaux NO° et NO_2° conduisant à la destruction de l'ozone.
- De la même manière, certains CFC tels que CFCl_3 et CF_2Cl_2 produisent des radicaux Cl° et ClO° conduisant au même processus. Les deux processus décrits ci-dessus sont naturellement limités par des réactions de neutralisation conduisant à la production du composé ClONO_2 .
- La disparition particulièrement intense de l'ozone au-dessus de l'Antarctique est un processus complexe, notamment lié à une réaction du type $\text{ClONO}_2 + \text{HCl} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{Cl}_2$, à la surface de cristaux de glace, dans lequel l'acide nitrique reste à l'état de glace (vers -80°C), tandis que le chlore se dégage à l'état gazeux et commence à se dissocier en radicaux Cl° à partir du mois de septembre où les photons solaires réapparaissent, amorçant ainsi la réaction catalytique décrite ci-dessus, et dont le résultat est rendu particulièrement intense régionalement par le confinement de l'air par le vortex circumpolaire.

La mesure et le suivi par observation spatiale de la concentration en ozone stratosphérique sont assurés par divers systèmes actuels ou futurs (TOMS, POAM/SPOT, GOMOS/ENVISAT).

2.2 - Synthèse sur le bilan radiatif de la Terre

Actuellement, on dispose de méthodes fiables permettant d'évaluer assez bien, à partir des données satellitales, toutes les composantes du bilan radiatif, ainsi que le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) (cf. les travaux de l'ISLSCP). Ces méthodes prennent en compte les effets des GES (approche (b)), ainsi que ceux des aérosols et des nuages, qui

agissent comme modulateurs des champs radiatifs dans l'atmosphère, ainsi qu'à ses limites supérieure et inférieure, par voie de conséquence. Le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère, tel que les satellites peuvent l'observer (instrument SCaRaB par exemple, ou prochainement GERB sur METEOSAT seconde génération, ou le projet ERM, objet d'une étude de phase A dans le cadre du programme "planète vivante" de l'ESA - Gundmandsen, 1999), est considéré comme un élément clé pour la modélisation globale (cf. ci-après, §5.2).

L'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre est susceptible de forcer le système climatique vers un état plus chaud. Il existe plusieurs estimations de ce réchauffement supplémentaire de l'atmosphère, qui donnent un total de 3 à 5 Wm⁻². Les conditions atmosphériques étant présumées toujours statiques dans ces calculs, ceux-ci ne sont donc pas très réalistes. Les modèles globaux de Circulation Générale fournissent des résultats quelque peu différents, car les processus décrivant le système climatique y sont paramétrés de manière très différentes. Aucune de ces estimations ne nous fournit d'informations fiables sur les changements de la nébulosité, des trajectoires et l'intensité des orages ou même des températures, ce que montrent par exemple les études de l'AMIP. Mais il est possible – et nécessaire – d'effectuer un suivi permanent, qui devra se fonder sur des plans de travail existants, tels que ceux du GOOS.

Il n'existe aucune chance de mener des recherches ou d'assurer le suivi de changements climatiques régionaux ou globaux grâce aux données provenant des composantes du bilan radiatif planétaire ou au sol, étant donné que ces flux radiatifs proviennent d'origines et de forçages trop différents. Il est toutefois important d'observer quelques composantes individuelles :

Au sol : les radiations spectrales descendantes dans le spectre solaire et infrarouge, les aérosols, les propriétés de la couche nuageuse (ex : épaisseur optique), les concentrations en gaz à effet de serre spécifiques,

A partir des satellites : les spectres mentionnés ci-dessus, certains types de nuages, les aérosols, la vapeur d'eau par occultation GPS. Divers projets d'observation de ces différents paramètres existent ou sont à l'étude : projet franco-japonais POLDER (Lifermann, 1998), instruments de chimie atmosphérique du satellite européen ENVISAT, projet franco-américain PICASSO-CENA...

Il est à noter de plus que le programme CLIVAR prévoit aussi un suivi permanent de différents paramètres atmosphériques, comprenant également les champs radiatifs, les nuages et les aérosols. Toutefois, il sera impossible de distinguer les variations climatiques «naturelles » de celles «induites par l'effet de serre ».

Enfin, en dehors de l'approche «bilan global », il faut que l'utilisation de modèles synthétiques globaux soit reconnue en tant que méthodologie parallèle. Ces modèles visent à comprendre la dynamique atmosphérique et les interactions des processus en ce qui concerne la chimie atmosphérique, l'absorption et l'émission de CO₂ et de CH₄ par les écosystèmes.

Au-delà des défis lancés par le protocole de Kyoto, l'observation de certaines composantes spécifiques du bilan radiatif au sol (mesures in situ) ou au sommet de l'atmosphère (par satellite), peut donc permettre de déduire quelques informations individuelles nécessaires à l'approche (b).

3 LES TERRES EMERGEEES

Pour des raisons à la fois naturelles et anthropiques, les terres émergées sont au coeur des problèmes abordés par le Manifeste de Baveno et le protocole de Kyoto. L'approche (a) implique une analyse géographique puisque, dans ce cas, les variations des bilans doivent être décrites au niveau de chaque Partie.

Les facteurs socio-économiques et biophysiques sont profondément imbriqués, car les variations en GES sont très liées aux activités humaines sur Terre (quasi exclusivement en ce qui concerne les composés fluorés). Le recueil d'informations explicites sur les sources de pollution et les sources de GES est un point important des aspects socio-économiques du protocole de Kyoto.

3.1 Suivi des écosystèmes

Dans le cadre de l'approche (a), il est nécessaire d'effectuer un suivi des paramètres énumérés ci-dessous. Ceci pourra selon toute vraisemblance être réalisé par des observations spatiales calées sur des observations *in situ* (au moins, pour la plupart de ces paramètres), lorsque le protocole de Kyoto entrera en vigueur. Lorsqu'ils sont pris en compte à l'échelle géographique adéquate, ces éléments sont également des points-clés en ce qui concerne les approches (b) et (c).

1. **Un indice du couvert végétal transformable en fraction de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) interceptée par le couvert végétal.** Les indices de végétation observables depuis l'espace à diverses résolutions temporelles et spatiales (LANDSAT, SPOT, IRS, NOAA-AVHRR, VEGETATION...) tels que le NDVI ou SR sont liés à f_{PAR} , la fraction de PAR, par des relations qui ne semblent pas dépendre du type de végétation.

La Productivité Primaire Nette (NPP) peut alors être calculée proportionnellement à la radiation absorbée :

$$NPP = e f_{PAR} PAR$$

e étant le degré d'efficacité de conversion biologique de la PAR absorbée par la biomasse. Dans certains modèles, il est considéré comme une caractéristique d'un type de végétation, dans d'autres il est calculé selon la formule suivante :

$$e = e_{max} f(SWD) g(VPD) h(T) i(C_a)$$

où e_{max} est la valeur maximum de e et f , g , h sont des facteurs de pondération (entre 0 et 1) qui prennent en compte l'effet du déficit en eau du sol SWD , le déficit de pression de vapeur d'eau dans l'air VPD et les températures non-optimales T . La fonction $i(C_a)$ dépend de la concentration atmosphérique en CO_2 C_a .

Dans des modèles plus complexes, e est calculé suivant un modèle détaillé de photosynthèse du couvert végétal et de respiration des plantes.

La Productivité Nette de l'Ecosystème NEP est le flux net intégré de CO_2 entre un écosystème et l'atmosphère. Il dépend non seulement de la NPP , mais aussi de la respiration hétérotrophique R_h :

$$NEP = NPP - R_h$$

R_h dépend principalement des déchets, des matières organiques contenues dans le sol, de la température et de l'humidité du sol, mais n'est pas directement mesurable par satellite.

On la calcule habituellement suivant un modèle de matière organique contenue dans le sol.

Actuellement, NOAA-AVHRR et VEGETATION fournissent des informations *NDVI* globales avec une bonne résolution temporelle (typiquement, une semaine pour une scène par temps clair), et une résolution spatiale d'un km environ. Ceci est dans l'ensemble suffisant pour les études globales sur le bilan du carbone. Les régions comme l'Europe ont toutefois besoin d'obtenir des informations ayant une meilleure résolution spatiale tout en gardant la même résolution temporelle, pour permettre par exemple le suivi des productions agricoles. Le système russe MSU-SK/RESURS, ainsi que le système MODIS/TERRA, le futur système MERIS/ENVISAT et certains projets à moyen terme du CNES tendent à répondre à ces besoins.

2. ***Un indice du contenu en azote du couvert végétal, qui est fortement corrélé à sa capacité de photosynthèse.*** Quelques tentatives ont été faites pour déduire cet indice de la réflectance dans le MIR (entre 1500 et 2000 nm), mais il peut être difficile d'établir une relation générale valable pour des types de végétation différents. Il est également possible de déduire en premier lieu le contenu en chlorophylle du couvert végétal de la réflectance dans le spectre optique (en utilisant un modèle des propriétés optiques des feuilles) et de le corrélérer avec le contenu en azote. Cette méthode pourrait fonctionner mais devrait être vérifiée sur plusieurs types de couvert végétal.
3. ***Un indice d'activité photosynthétique.*** Il est bien de connaître le couvert végétal, mais il serait mieux de savoir s'il souffre ou non de stress. Ceci s'applique en particulier aux forêts qui gardent longtemps leurs feuilles, et répondent au stress hydrique par la fermeture de leurs stomates bien avant de perdre leurs feuilles. Dans ce but, plusieurs solutions ont été étudiées. La température (radiation thermique) n'est pas une donnée très sensible pour les forêts «fermées» dont la température de surface n'augmente pas de plus de 3° lorsque les stomates se ferment. La prise en compte de la fluorescence de la chlorophylle est une solution possible, mais qui demande l'utilisation des raies de Fraunhofer et sa faisabilité reste à prouver. Cette solution doit néanmoins être explorée. Entre temps, il est possible d'utiliser les changements de réflectance dans le spectre 500-550 nm, qui reflète les changements dans la composition caroténoïde des feuilles (ce que l'on appelle le cycle xanthophylle). Ceci nécessite un capteur à plusieurs bandes (10 nm ?) dans ce spectre, ce qui sera prochainement disponible (instruments MERIS/ENVISAT et MODIS/TERRA).
4. ***Un indice de biomasse par surface au sol pour les forêts.*** On a essayé avec succès d'obtenir cet indice au moyen de la diffusion radar dans la bande P (longueur d'ondes d'environ 0.6 m), pour un certain type de forêt et pour une biomasse inférieure à 150 t.ha⁻¹ environ. Toutefois, on ne sait pas si cette relation est généralisable. Une autre approche intéressante consiste à mesurer la hauteur de la végétation par Lidar. Un capteur américain (Vegetation Canopy Lidar, VCL) devrait être lancé en l'an 2000. La biomasse est liée à la hauteur pour une partie importante du cycle de croissance des forêts.
5. ***D'autres variables sont assez intéressantes pour le cycle du carbone.*** Le contenu du sol en carbone et en azote est un paramètre important. Toutefois, il ne semble pas mesurable par satellite. L'humidité de la surface du sol est également assez intéressante, et peut être déduite de mesures radar. L'humidité du sol influence sa capacité à agir en tant que puits de méthane ; d'autre part, le réchauffement global fait fondre le permafrost, ce qui constitue une importante source de méthane. Le projet SMOS, développé par le CESBIO, retenu comme "mission d'opportunité" du programme "planète vivante" de l'ESA, se propose d'atteindre de tels objectifs. Sa résolution spatiale n'est pas assez fine pour satisfaire tous les besoins exprimés ici, en particulier en ce qui concerne l'approche (a), mais c'est une tentative importante dans cette direction.

Les principales sources de méthane susceptibles d'être déterminées par les techniques d'observation de la terre sont les rizières et les marécages (cf. tableaux 3 et 4). La cartographie des marécages a été entreprise dans le cadre du programme IGBP-DIS (Darras et al., 1999). Il est toutefois difficile de déterminer quantitativement les flux réels de méthane, car des processus biochimiques complexes sont impliqués. La détermination des flux concernant d'autres sources sont étroitement liés aux paramètres socio-économiques (cf. §2.2).

3.2 Changement dans l'utilisation et la couverture des sols

Les besoins en informations concernant l'utilisation et la couverture des sols afin de contrôler le bilan en gaz carbonique ou les émissions de méthane et de protoxyde d'azote sont bien différents. Dans le premier cas (CO_2), on a surtout besoin de données sur les changements de biomasse pour les écosystèmes forestiers et les tourbières. Dans le second cas (CH_4 et secondairement N_2O), on a besoin d'informations détaillées sur les pratiques de culture et d'élevage (utilisation d'intrants, fumure, irrigation, etc.).

Pour ce qui est de l'utilisation et de la couverture des sols, on peut distinguer quatre besoins primordiaux en matière d'informations :

Une carte de référence du couvert végétal,

L'évaluation quantitative des transformations et des modifications du couvert végétal,

Le suivi des perturbations du paysage, plus particulièrement pour les écosystèmes forestiers (ex : incendies, orages, maladies, etc.) et du taux de régénération du couvert végétal après ces perturbations,

Des informations sur les pratiques d'utilisation des sols (type de gestion de la forêt, pratiques agricoles, utilisation d'intrants, etc.).

Les informations sur les pratiques sylvicoles sont essentielles pour comprendre le rôle des forêts dans le cycle du carbone. Par exemple, on voudrait obtenir des informations sur *les pratiques de conservation de la forêt* (protection, conservation et exploitation durable de la forêt, politiques visant à réduire le taux de déforestation et la dégradation des forêts), *les pratiques de gestion des stocks* (le stockage de carbone dans les forêts lié à une augmentation de la zone forestière, des rotations plus longues, des densités d'arbres plus élevées et une meilleure préservation des produits du bois) et *les pratiques de gestion de produits de substitution* (utilisation de biocarburants exploitables durablement). De telles données ne peuvent pas être estimées par la télédétection. Elles ne sont pas habituellement disponibles en tant que données géoréférencées.

La conséquence des points ci-dessus est que l'incertitude relative la plus élevée pour l'évaluation de l'émission de gaz carbonique concerne le facteur «changement dans l'utilisation des sols et sylviculture » (LUCF) (cf. tableau 4). Pour l'étude de l'évolution des puits de carbone liée aux changements dans l'utilisation des sols, le problème de l'évaluation de la situation pour l'année de référence 1990 doit être résolu. L'observation de la Terre n'est pas seulement une activité tournée vers l'avenir et destinée à assurer un suivi après l'an 2000, elle répond également à un besoin d'archivage (LANS DSAT, SPOT et plus marginalement ERS) afin d'évaluer la situation pour les années de référence du protocole de Kyoto.

Le pourcentage d'incertitude sur l'estimation de l'émission globale de méthane due aux activités humaines est aujourd'hui évalué à 30 % environ. Les estimations des sources sont incertaines, principalement à cause du manque de facteurs d'émission représentatifs. Il est nécessaire d'améliorer les données concernant les activités dans le secteur du LUCF, en

particulier pour les pays en voie de développement. Par exemple, le taux d'émission de méthane par les rizières est très incertain. Pour cette activité, les données comprennent des informations sur les zones de rizières et les périodes d'inondation. Toutefois, l'incertitude la plus grande provient de facteurs variés et très imbriqués, tels que la variété de riz, les propriétés du sol, la température, la présence de microbes, les pratiques de fertilisation par les agriculteurs locaux, etc.

Afin de satisfaire les besoins de l'approche (a), les informations doivent être explicites au plan spatial et leur résolution spatiale doit être assez fine (quelques dizaines de mètres). Il faut aussi que les informations soient quantitatives, non seulement en termes de surfaces concernées, mais aussi en termes de changements de biomasse et des flux impliqués. Seule une combinaison de données issues des systèmes de télédétection, des inventaires forestiers effectués sur place, de données expérimentales issues de parcelles échantillons, et de données socio-économiques détaillées sur les pratiques de gestion et les facteurs technologiques permettra de satisfaire les besoins en informations concernant le changement dans l'utilisation et la couverture des sols pour la période post-Kyoto.

Certains modèles globaux de changements dans l'utilisation des sols calculent les taux de ces changements à venir en fonction des facteurs socio-économiques et de leurs interactions avec les processus biophysiques. Bien que ces modèles soient utiles pour la conception de scénarios globaux, la valeur de leurs prévisions est limitée. En fait, ces modèles ne sont pas encore très fiables en termes de projections à long terme. En effet, de nombreux facteurs tels que les changements institutionnels, technologiques ou politiques interfèrent de façon significative avec les facteurs les plus facilement prévisibles de changement dans l'utilisation des sols. Les modèles de changement dans l'utilisation des sols ne sont pas encore tout à fait opérationnels non plus en ce qui concerne la prévision des caractéristiques spatiales des changements et la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale. Toutefois, un effort considérable est actuellement consacré à la conception de modèles robustes de changement dans l'utilisation des sols.

3.3 Synthèse

En synthèse globale de ce chapitre 3, les outils spatiaux nécessaires en priorité sont d'une part les systèmes à haute résolution (optiques et radar) permettant une définition précise de l'occupation du sol et de ses changements sur une base typiquement annuelle, et d'une part des systèmes d'observation à moyenne résolution (typiquement hectométrique à kilométrique) des caractéristiques de la végétation et plus généralement des écosystèmes listées au § 3.1 sur une base typiquement décadaire. Un certain nombre de modes complémentaires d'observation (radar en bande P, lidar, microondes passives, mode hyperspectral dans certaines régions du spectre...) ont également été évoqués. Les principaux systèmes spatiaux d'observation actuels et futurs pouvant répondre à ces besoins ont été évoqués plus haut. Ces données doivent être couplées à des informations *in situ* de nature très diverse, à travers des modèles adéquats, notamment en termes de précision et d'échelle spatio-temporelle. Il convient notamment de disposer de modèles pertinents à l'échelle des régions (au sens européen du terme). Ce n'est actuellement pas le cas, l'attention s'étant surtout concentrée jusqu'à une date récente soit vers les modèles locaux, soit vers les modèles globaux (Menaut, 1999, communication personnelle). Ce domaine de recherche est actuellement très actif ; des résultats décisifs sont attendus dans les années à venir.

4 LES OCEANS

Comme on peut le déduire des tableaux (2) et (3), la contribution des océans au bilan en CO_2 est du même ordre de grandeur que la contribution des terres. Leur contribution est bien moins importante pour le bilan en CH_4 . Cette contribution doit être analysée dans le cadre de l'approche (b). De plus, les océans jouent un rôle bien connu dans les changements climatiques, et sont également un facteur de premier plan à prendre compte dans le cadre de l'approche (c). L'élévation du niveau des mers (§ 4.2) est un indicateur particulièrement significatif des changements climatiques globaux et a un impact majeur sur la société, comme évoqué au § 1.3. Pour ces deux raisons, les approches (b) et (c) doivent prendre en compte la contribution des océans.

4.1 Contribution des océans au bilan du carbone.

Selon le lieu et la saison, les océans agissent soit en tant que source, soit en tant que puits vis à vis du CO_2 . La différence en pression partielle (DpCO_2) entre l'atmosphère et les océans régit le sens des échanges en CO_2 et leur intensité (qui est également influencée par les vents). Cette différence est déterminée par des processus physiques (réchauffement / refroidissement de la couche de mélange, mélange vertical et advection, circulation) ; ce que l'on appelle la "pompe thermodynamique" est modulée par les activités biologiques (par la photosynthèse et l'oxydation / la respiration), que l'on nomme collectivement "pompe biologique".

La fixation annuelle de carbone par la photosynthèse due au phytoplancton (environ 50 Pg C par an) est du même ordre que celle due à la végétation terrestre. La biomasse des algues, toutefois, est bien plus faible que la biomasse terrestre, de sorte que la période de renouvellement du CO_2 dans les couches supérieures de l'océan est extrêmement courte (inférieure à 1 semaine) par rapport au renouvellement sur terre (15-25 ans).

Dans la mesure où tout changement de climat est susceptible d'affecter la circulation générale, l'épaisseur et la température de la couche de mélange, l'activité de mouvement vertical, la nébulosité, etc. il peut induire des variations dans le processus de production primaire locale et globale, et même dans les processus consécutifs à l'intérieur de la chaîne écologique, et par conséquent dans la situation géographique et la taille des sources et des puits océaniques de CO_2 . La connaissance de ces phénomènes imbriqués nécessite une modélisation couplée (de l'état actuel, avant de traiter la question des perturbations), combinée à l'observation par satellite.

A l'échelle globale, les paramètres pertinents observables concernant l'aspect physique sont la température à la surface de la mer (SST), la nébulosité, la circulation, les vents (radiomètres, altimètres, diffusiomètres). Le paramètre observable pertinent pour ce qui est de l'aspect biologique est la couleur de l'océan, qui est liée à la quantité et à la répartition de la biomasse d'algues. Les principaux systèmes d'observation sont CZCS de 1978 à 1986, puis POLDER et OCTS sur ADEOS, maintenant SeaWiFS/SEASTAR et dans un proche futur MODIS/TERRA, MERIS/ENVISAT, POLDER-2 et GLI sur ADEOS-2 (Bricaud, 1998).

L'Agence Spatiale Européenne (avec ERS2 puis ENVISAT) et le CNES (avec TOPEX-POSEIDON, puis JASON et POLDER-2), peuvent effectuer un suivi océanique global des paramètres concernés, au moins de la période actuelle à 2005. Au-delà de 2005, il reste des incertitudes (notamment dans l'observation de la couleur des océans). De plus, pour assurer la couverture fréquente et globale nécessaire à ce type d'études et au support aux activités de modélisation et d'assimilation, il faut souvent plus d'un seul instrument. Par conséquent, la coordination entre Agences est vivement souhaitable, en termes de compatibilité des

systèmes d'observation, de mise en phase des orbites, d'algorithmes, de cohérence des produits et de fusion des données.

4.2 Suivi du niveau des mers

La fonte des glaciers et des plaques de glace liée au réchauffement global va provoquer une élévation globale du niveau des mers. C'est un des effets les plus connus des interactions entre cryosphère et hydrosphère impliquant un échange de masses entre la cryosphère et les océans. L'augmentation de la température globale provoquera également un changement de volume, induisant donc une élévation du niveau des mers liée à l'expansion thermique de l'eau des océans. Toutefois, on ne sait pas encore très bien si les plaques de glace polaire augmentent ou diminuent ni dans quelle proportion et de quelle façon elles seront affectées par le réchauffement global. Les modèles de prévisions ne concordent pas en ce qui concerne le degré de réchauffement attendu dans des latitudes élevées, ce qui rend son impact sur l'équilibre des masses de glace dans l'Arctique difficile à connaître. Il existe également des différences régionales du taux d'élévation du niveau des mers, ce qui complique les estimations. Toutefois, la variabilité spatiale devrait être prise en compte par les modèles afin de fournir des prévisions régionales fiables.

Les fluctuations du niveau des mers peuvent être mesurées avec la précision nécessaire pour contribuer aux études sur le changement climatique par un ensemble de différents systèmes d'observation :

L'altimétrie satellitale (ERS, TOPEX-POSEIDON puis JASON). Cette technique fournit des mesures absolues de hauteur de la surface des mers, ce qui permet de suivre très précisément les changements de niveau des mers,

Les marégraphes mesurent les changements du niveau des mers par la variation de la position relative entre l'écorce terrestre et la surface des océans, de sorte que les mouvements verticaux de l'écorce terrestre influencent ces mesures et doivent être suivis. Le GPS et le système DORIS permettent de suivre de façon fiable, avec une précision millimétrique, les mouvements verticaux de l'écorce terrestre à l'emplacement des marégraphes, ce qui permet de faire la différence entre les variations réelles du niveau des mers et les mouvements de surface verticaux,

L'altimétrie par laser aéroporté vise principalement à déterminer le niveau des mers des zones côtières afin de rapprocher les données sur les eaux profondes que fournit l'altimétrie satellitale de celles fournies par les stations côtières de mesure des marées.

Il est nécessaire de recueillir et de stocker en permanence des données hydrométéorologiques de bonne qualité qui contribueront à la compréhension du comportement et des interactions entre les différentes composantes du système terrestre. On peut citer par exemple la pression de surface, l'épaisseur et la couverture neigeuse, l'humidité du sol, le ruissellement, la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, les précipitations et l'évaporation, la masse des océans, la température de surface des mers et le niveau stérique des mers.

5 CONCLUSION: SUJETS GLOBAUX ET MODELISATION GLOBALE

En conclusion, nous souhaiterions analyser les dimensions en aval des données et des informations nécessaires à l'étude globale de l'environnement. En effet, il est nécessaire de bien connaître les besoins des clients pour leur fournir des produits de qualité. Tout d'abord, nous étudierons l'utilisation ultime de ces connaissances, à savoir la résolution de problèmes sociaux. Ensuite, nous nous consacrerons aux consommateurs immédiats de ces informations, c'est à dire, les modèles globaux.

5.1 Les besoins en informations socio-économiques

Comme nous l'avons vu précédemment, les informations socio-économiques sont directement nécessaires à un suivi global, au moins pour deux raisons :

- Tout d'abord, certaines émissions et certains puits ne peuvent être déduits que de données nationales ou locales. C'est par exemple le cas pour les émissions industrielles et les conséquences des mécanismes du protocole de Kyoto sur celles-ci.
- En second lieu, certaines informations dérivées des observations par satellite et/ou de mesures in situ doivent être couplées à des facteurs socio-économiques pour pouvoir fournir les paramètres nécessaires. Par exemple, comme nous l'avons vu précédemment, les données sur les pratiques culturelles ou les informations sur la gestion des forêts doivent être couplées à celles concernant l'observation de l'utilisation et de la couverture des sols pour pouvoir accéder aux flux de carbone.

Plus précisément, les résultats des quatre projets principaux du programme de recherche IHDP mettent en évidence les besoins suivants :

I - *Changement dans l'utilisation et la couverture des sols (LUCC)*. Ce sujet comporte de nombreux problèmes socio-économiques, décrits au § 3.2. Nous nous contenterons de rappeler ici l'importance des modes de propriété des terres et des ressources, et des problèmes sociaux qui y sont liés.

II - *Changement Global de l'Environnement et Sécurité de l'Homme (GECHS) & Gestion des Catastrophes*. La demande sociétale peut permettre de mieux définir les besoins d'un système de suivi global de l'environnement (approche (c)), capable de fournir des prévisions climatiques et météorologiques extrêmes à moyen terme (de 10 jours à une année et demie). C'est une demande très forte de la part du secteur agricole, de la gestion des eaux, des assurances sur les récoltes et les tempêtes. Pour parvenir à une telle analyse, il faudrait combiner l'aspect physique de l'évaluation des risques aux informations détaillées sur les populations et les informations socio-économiques géoréférencées (ex : cartographie des zones sensibles).

III - *Dimensions institutionnelles du Changement global d'environnement (IDGEC)*. Ce point épineux pourrait être à l'origine de problèmes susceptibles d'influencer la stratégie de suivi. Les mécanismes de coopération qui sont partie intégrante du protocole de Kyoto ont un impact significatif sur la conception et la mise en œuvre d'un réseau de suivi. Afin de vérifier sa conformité au plan général, l'atelier de l'IPCC sur les émissions de GES (qui a traité des informations à la fois «montantes » et «descendantes ») a estimé essentiel de combiner les données des satellites aux mesures locales et aux modèles globaux de dispersion les plus précis afin d'effectuer le suivi des émissions locales et régionales de CO₂, CH₄ et N₂O.

IV - *Transformation industrielle (IT)*. Le but final de ce programme est de connaître les facteurs majeurs de changement dans les processus de production et de consommation (y compris pour l'industrie des services) et leurs implications concernant l'environnement global. Quatre thèmes ont été retenus : Energie, Alimentation, Zones urbaines et Communications.

- 1 *Energie* : Pour optimiser la production d'énergie à partir de ressources renouvelables (ce qui entre dans le cadre des CDM) il est nécessaire d'obtenir les informations suivantes : cartes détaillées de l'énergie Solaire disponible (à l'échelle kilométrique) ; carte des sites les plus favorables pour la production d'énergie éolienne (échelle : 10 mètres) ; disponibilité de la biomasse et potentiel de repousse, intensité des feux, rapport CO/CO₂ lié à la combustion, formation de l'ozone troposphérique ; émission de CO₂ due aux feux de brousse et de forêt (dimension géographique et physique), feux de charbon (Chine), feux de tourbe, zones de stockage des déchets, gazoducs et flaming. De telles informations peuvent être prises en considération dans le cadre de l'approche (a), de façon spécifique : elles ne permettent pas de prévoir ni d'observer l'évolution du bilan en GES, mais constituent toutefois une importante base de négociations dans le cadre du protocole de Kyoto.
- 2 *Alimentation* : Informations sur la chaîne des protéines : transformation plante-nourriture en plante-bétail-nourriture.
- 3 *Zones urbaines* : Pour mieux connaître le bilan en GES directement liés aux effets anthropiques directs, il faut mettre l'accent sur les zones très peuplées, et en particulier les mégapoles. Il est nécessaire d'obtenir des informations sur l'intensité des activités économiques, et sur les flux d'eau, d'énergie et de transport. Il faut effectuer un suivi des zones de stockage des déchets, des émissions de GES, des déchets industriels et de la biodiversité, du développement urbain et de l'utilisation des sols, des prévisions d'augmentation de la population et de l'urbanisation.
- 4 *Communications*: Les facteurs liés aux communications peuvent avoir une influence positive sur la réduction des émissions anthropiques. Il faudrait améliorer l'utilisation des données disponibles pour rendre les prises de décisions directes et opérationnelles (peut-on diminuer la pression sur l'environnement lorsqu'on dispose à temps d'informations sur l'agriculture, la biomasse brûlée, la production d'énergie solaire et éolienne ?). Une information adéquate peut-elle améliorer les prises d'engagement des décideurs ? Il faudrait améliorer les outils de télécommunications pour réduire la densité du trafic (automobile et aérien).

Il faut remarquer que les activités militaires ne font pas partie du protocole, bien qu'étant une source d'émissions. Nous allons maintenant nous tourner vers les aspects indirects ayant une plus profonde influence sur les besoins en données. Les deux points suivants doivent être présents à l'esprit lorsqu'on considère les besoins en informations socio-économiques permettant de mettre en œuvre le protocole de Kyoto :

Tout d'abord, le souci de l'acceptation par la société des mesures prises pour la réduction du bilan en GES devrait être associé aux mesures "objectives". L'un des problèmes socio-économiques est que la quantité d'émissions est un paramètre mesurable physiquement : toutefois, c'est la qualité des émissions qui détermine l'acceptation par la société de ces mesures. Par exemple, utiliser du bois au lieu du carburant pour des activités vitales (cuisson des aliments, chauffage) est d'un autre ordre qu'utiliser du bois pour fabriquer des journaux. Plus précisément, c'est la survie par rapport au luxe. Toujours en termes d'acceptation par la société, le "Mécanisme de Développement Propre" (CDM) lui-même comprend des mécanismes favorisant les investissements pour réduire les émissions dans les pays en voie de

développement dont bénéficieront les couches relativement urbanisées et riches de ces sociétés, mais pas les minorités rurales, pauvres, ethniques ni les femmes et les enfants. Une méthode basée sur la seule physique des phénomènes ne peut pas traiter ces sujets et peut même conduire à des stratégies contre-productives.

En second lieu, la mise en œuvre du protocole de Kyoto, même dans le cadre de l'approche (a), nécessite un consensus international sur la façon dont les informations qualitatives et quantitatives sûres et fiables sur plusieurs années seront traitées opérationnellement. Ceci implique que, pour suivre l'application du protocole et vérifier sa conformité, il faut disposer de concepts ayant fait leur preuve dans le domaine de la collecte de données d'observation de la terre et de leur traitement.

Enfin, disposer de systèmes opérationnels est bien sûr une condition préalable à l'obtention d'informations. Mais pour que la mise en œuvre des données d'observation de la terre soit un succès et permette d'assurer le suivi de l'application du protocole et de vérifier sa conformité, il faut que les utilisateurs finaux soient plus impliqués. Par conséquent, le développement de logiciels, de méthodologies, d'expertise, de transfert de technologies et d'applications opérationnelles devrait constituer un volet important de l'effort et des budgets de développement.

5.2 Modélisation globale

Il n'est pas possible de réfléchir en termes de systèmes globaux d'observation de la Terre sans prendre en considération l'état actuel de la modélisation globale. Ces modèles sont nécessaires pour atteindre trois objectifs :

- Faciliter l'analyse et l'assimilation des données disponibles, afin de créer des ensembles de données cohérents : ceci fait partie intégrante de l'effort de suivi ;
- Faciliter la détection de la survenue de changements climatiques induits par l'homme,
- Prévoir les évolutions à venir (du système climatique, du cycle du carbone, ou du couplage des deux),

L'Europe est à l'avant-garde en ce qui concerne le développement de ces modèles, à la fois grâce à ses centres météorologiques opérationnels (ECMWF, Météo-France, UKMet Office) et ses centres de recherche (Institut Max Planck, IPSL/CNRS).

Concernant l'activité de modélisation, les besoins en données sont quasiment illimités (TOUTES les données peuvent être utilisées pour vérifier des modèles), mais certains points méritent d'être soulignés :

- La circulation atmosphérique est actuellement analysée avec une bonne précision. Sa description pourrait être améliorée grâce à une mesure plus directe des vents verticaux, au moyen du Lidar. Tel est notamment l'objectif du système ADM du programme "planète vivante" de l'ESA, dont la phase B vient d'être lancée suite à la Conférence de Grenade II (Gundmandsen, 1999).
- Les deux paramètres clés permettant de décrire l'évolution climatique sont le champ des précipitations et le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère. Ces paramètres ne sont pas très bien analysés par les modèles, et leur suivi direct au moyen d'observations spatiales est essentiel. Le suivi des précipitations dans la zone tropicale est l'objectif majeur du système nippo-américain TRMM, les instruments de suivi du bilan radiatif ont été présentés au § 2.2.
- La récente controverse au sujet des tendances de la température troposphérique a également montré les limites des estimations actuelles.

Les modèles climatiques actuels divergent encore en ce qui concerne les changements climatiques à venir. Ce phénomène ne fera que s'intensifier lorsque ces modèles seront couplés aux modèles de cycle du carbone.

Cette divergence est due à la rétroaction liée aux nuages, à la vapeur d'eau, la neige, la glace des mers. De nombreux paramètres pertinents doivent être mesurés simultanément afin de fournir une mesure correcte de tels processus de rétroaction. Des missions satellites consacrées aux recherches liées à ces processus sont par conséquent nécessaires pour aider à réduire les incertitudes des modèles les concernant. C'est par exemple le cas pour tous les paramètres liés aux nuages : il est nécessaire de comprendre les variations simultanées de hauteur des nuages, leur contenu en eau, leur structure en trois dimensions, grâce à une combinaison d'instruments (micro-ondes passives, lidars, radars, spectrométrie à haute résolution), afin d'améliorer les modèles utilisés pour les climats à venir. Entre autres, tel est notamment l'objectif du futur système franco-américain PICASSO-CENA. Mais le suivi de certains des paramètres contribuant à la rétroaction vers le climat peut également aider à vérifier si celui-ci est en train de changer. Ceci est particulièrement vrai pour toutes les informations concernant l'étendue du manteau neigeux ou de la glace des mers. Les systèmes d'observations optiques et radar existants et à venir, et le futur système de l'ESA CRYOSAT (programme "planète vivante", mission d'opportunité) peut apporter des informations dans ces domaines.

Les sujets globaux ne se posent pas lorsque seule l'approche (a) est prise en considération. Toutefois, ils doivent être pris en compte lorsqu'on considère les objectifs (b) puisque le système terrestre doit être décrit, observé et modélisé dans son ensemble, et que les impacts des variations locales et régionales en émission et suppression de GES doivent être transformés en estimations de l'évolution de la concentration globale. De plus, comme indiqué ci-dessus, il est nécessaire de développer l'étude des impacts biophysiques et anthropiques sur les changements climatiques. Il va sans dire qu'une telle approche est encore plus large et plus importante dans le cadre de l'approche (c). Les liens entre les sources, la dispersion et les puits deviennent de plus en plus importants. L'intégration (i) des dernières connaissances (ii) des mesures des émissions et des puits et (iii) de la modélisation de la dispersion dans l'atmosphère peut mener à accroître la connaissance et le contrôle des émissions régionales. Dans ces modèles intégrés, les données de télédétection peuvent être combinées à des mesures in situ afin de fournir les informations les plus appropriées, et afin de comprendre les bilans en GES de façon suffisamment ouverte pour entreprendre des recherches sur les inventaires d'émissions de manière indépendante.

BIBLIOGRAPHIE

Adger, W.N. and Brown, K. 1994: Land use and the causes of global warming. *Chichester: John Wiley & Sons.*

Belward, A. S., 2000, A Policy context for global environmental information systems, proceedings of the workshop on Remote sensing and long-term global data sets for climate studies, Dundee 2nd – 13th August 1999. (*Springer Verlag: in press*)

Belward, A. S., 2000, The Potential Use of Satellites and the Kyoto Protocol, *Invited paper for presentation at the 28th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Cape Town, SA, 27-31 March 2000.*

Bicheron, P., Leroy, M., 1998: A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model, *accepted in Remote Sensing of the Environment, April 21, 1998.*

Bricaud, A., 1998: SeaWIFS et la couleur de l'océan, *Lettre PIGB-PMRC France n° 8, septembre 1998, 48-52.*

Briffa, K.R., et al., 1995: Unusual twentieth century warmth in a 1000-year temperature record from Siberia. *Nature* 376, 156-159.

Commission des Communautés Européennes, Communication de la Commission au Conseil et au Parlement Européen, "Changement climatique - vers une stratégie communautaire post-Kyoto", Bruxelles, 03.06.1998, COM(1998) 353 final.

Commission of the European Communities, Communication from the Commission to the Council and the European parliament, "Preparing for Implementation of the Kyoto Protocol", Brussels, 19.05.1999, COM(1999) 230 final.

Coppin, P.R. and Bauer, M.E. 1996: Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews in press*.

Darras, S., Michou, M., Sarrat, C., 1999 : IGBP-DIS Wetland data Initiative . A first step towards identifying a global delineation of wetlands, *IGBP-DIS Working paper # 19*, February 1999.

Dedieu, G., Lafont, S., Cayrol, P., Chehbouni, A., Kergoat, L., Maisongrande, P., Watts, C., Berthelot, B., Gérard J.C., François, L., Graetz, D., Ruimy, A., Moulin, S., Saugier, B. 2000: STEM-VGT: Satellite Measurements and terrestrial Ecosystem Modeling using VEGETATION instrument, *VEGETATION 2000 conference, belgirate, April 2000*.

Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C. and Wisniewski, J. 1994: Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263, 185-190.

Downton, M.W. 1995: Measuring tropical deforestation: Development of the methods. *Environmental Conservation* 22, 229-240.

Estes, J. E., Belward, A. S., Loveland, T. R., Scepán, J., Strahler, A., Townshend, J. R. G., and Justice, C.O., 1999 Global Land Cover Mapping, The Way Forward, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, 1089 - 1093.

Fontelle, J.P. et al. 1999. Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au cours de la période 1990-1997. Format IPCC. *CITEPA (Rapport au Ministère de l'Environnement)*

Global Monitoring for Environmental Security - A Manifesto for a new European Initiative, October 1998, BNSC, CNES, DLR, EARSC, ESA, EUMETSAT, European Commission.

Graedel, T.E., Crutzen, P.J., 1993: Atmospheric Change. An Earth System Perspective, *W.H.Freeman and Company, New York, 1993*.

Gudmandsen, P., 1999: News from ESA : Granada II (October 1999), *EARSeL Newsletter N° 40*, 7-9, December 1999

Gupta, J. (1998): 'International Environmental Law: An Introduction', *Course Materials for the Masters Programme in Environmental Science and Technology, 1998*

Henderson-Sellers, A. 1994: Land-use change and climate. *Land Degradation & Rehabilitation* 5, 107-126.

Houghton, R.A., Unruh, J.D. and Lefebvre, P.A. 1993: Current land cover in the tropics and its potential for sequestering carbon. *Global Biogeochemical Cycles* 7, 305-320.

Houghton, R.A. 1994: The worldwide extent of land-use change. *Bioscience* 44, 305-313.

IPCC (1994): "Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios". J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell (Eds). *Cambridge University Press, UK. 339pp. (ISBN 0-521-55962-6)*.

IPCC (1996): "Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions". J Houghton, L G Meira Filho, B Lim, K Treanton, I Mamaty, Y Bonduki, D J Griggs and B ACallender (Eds.). *Volume 1. IPCC/OECD/IEA. UK Meteorological Office, Bracknell*.

Kasperson, J.X., Kasperson, R.E. and Turner II, B.L. 1995: Regions at risk. *Tokyo: United Nations University Press*.

- Lacaux, J.P., R. Delmas, B. Cros, B. Lefeuvre, and M.O. Andreae, Influence of biomass burning emissions on chemistry in the equatorial forest of Africa, in *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications*, edited by J.S.LEVINE, pp. 167-173, MIT press, Cambridge, Mass., 1991
- Lacaux J.P., H.Cachier and R.Delmas, Biomass burning in Africa: an overview of its impact on atmospheric chemistry, in *Fire in the Environment: The Ecological Atmospheric and Climatic Importance of vegetation Fires*, edited by P.J.Crutzen and J.Goldammer, pp.159-191, John Wiley, New York, 1993
- Lafont, S., Chevillard, A., Kergoat, L., Dedieu, G., Maisongrande, P., 1999: Modélisation des flux de CO₂ à l'aide du capteur VEGETATION: Etude de l'Europe et de la Sibérie, *Atelier de modélisation de l'atmosphère, Météo-France, Toulouse, Décembre 1999*.
- Lambin E.F. and Ehrlich D., 1997. Land-cover changes in sub-Saharan Africa (1982-1991): Application of a change index based on remotely-sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale, *Remote Sensing of Environment*, vol.61, no.2, pp.181-200.
- Lambin E., 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions, *Progress in Physical Geography*, vol.21, no.3, pp.375-393.
- Le Dantec V., Dufrêne E. and Saugier B., 2000 - Interannual and spatial variations of maximum leaf area index in temperate deciduous stands, *Forest Ecology and Management* (in press)
- Lifermann, A., 1998: POLDER: un concept original pour observer la Terre, *Lettre PIGB-PMRC France n° 8*, septembre 1998, 44-47.
- Maisongrande P., Ruimy A., Dedieu G. and Saugier B., 1995. Monitoring seasonal and interannual variations of gross primary productivity, net primary productivity and net ecosystem productivity using a diagnostic model and remotely sensed data. *Tellus*, **47B**, 178-190.
- Mann et al. 1998. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* **392**, 779-788.
- Menaut, J.C., 1999: communication personnelle sur les modèles d'émissions géoréférencés à moyenne échelle.
- Meyer, W.B., and Turner II, B.L. 1994: Changes in land use and land cover: A global perspective. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Moore, B. 2000: Le Programme International Géosphère-Biosphère : une étude du changement global. Quelques réflexions. *Lettre PIGB-PMRC France n° 10*, Février 2000.
- Nemani, R.R., Running, S.W., Pielke, R.A. and Chase, T.N. 1996: Global vegetation cover changes from coarse resolution satellite data. *Journal of Geophysical Research* **101 D3**, 7157-7162.
- Petit et al. 1999: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, **399**, 429 - 436
- Rivière, E 1999. Evaluation des puits de CO₂ suivant la nouvelle méthode préconisée par le GIEC. CITEPA, sous presse (rapport au Ministère de l'Environnement).
- Rotmans, J. and Swart, R.J. 1991: Modelling tropical deforestation and its consequences for global climate. *Ecological Modelling* **58**, 217-247.
- Ruimy A., Dedieu G. and Saugier B., 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, **99, D3**, 5263-5283.
- Ruimy A., Dedieu G. and Saugier B., 1996 : TURC - Terrestrial Uptake and Release of Carbon by vegetation, a diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity. *Global Biogeochemical cycles*, **10**, 269-285.
- Ruimy A., Jarvis P., Baldocchi D.D. and Saugier B., 1995. CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation: a review. *Advances in Ecological Research*, **26**, 1-6
- Ruimy A., Kergoat L., Field C.B., Saugier B. (1996). The use of CO₂ fluxes in models of the global terrestrial carbon budget. *Global Change Biology*, **2**, 287-296.

Skole, D. and Tucker, C. 1993: Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science* **260**, 1905-1910.

W. Steffen, I. Noble, J. Canadell, M. Apps, D. Schulze, P. Jarvis, D. Baldocchi, P. Ciais, W. Cramer, J. Ehleringer, G. Farquhar, C. Field, A. Ghazi, R. Gifford, M. Heimann, R. Houghton, P. Kabat, C. Koerner, E.F. Lambin, S. Linder, J. Lloyd, H. Mooney, D. Murdiyarso, W. Post, C. Prentice, M. Raupach, D. Schimel, A. Shvidenko, R. Valentini (IGBP Terrestrial Carbon Working Group), 1998. The Terrestrial Carbon Cycle: Implications for the Kyoto Protocol, *Science*, vol. 280, 29 May 1998, pp. 1393-1394.

Tett, S.F.B. et al. 1999 Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface, *Nature*, 399, 569 - 572 .

Turner II, B.L., Meyer, W.B. and Skole, D.L. 1994: Global land-use/land-cover change: towards an integrated study. *Ambio* **23**, 91-95.

Turner II, B.L., Skole, D.L., Sanderson, S., Fischer, G., Fresco, L. and Leemans, R. 1995: Land-use and land-cover change: Science/research plan.. *IGBP Report 35, HDP Report 7, Stockholm: The Royal Swedish Academy of Sciences.*